

氏 名	桑原 克和
所 属	理工学研究科 電気電子工学専攻
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	理工博 第 329 号
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	Design and Implementation of Current Sensor Using Air-Core Coil for Integrated Power Converter Circuits 集積電力変換回路を対象とした空芯コイルを用いた電流センサの設計と実装（英文）
論文審査委員	主査 准教授 和田 圭二 委員 教 授 清水 敏久 委員 准教授 鈴木 敬久 委員 教 授 Jean-Luc Schanen(グルノーブル大学)

【論文の内容の要旨】

輸送機の電動化などの普及によって電気エネルギーの需要が増加しており、その結果、化石燃料の消費も年々増加している。この問題を解決する技術の一つとしてパワーエレクトロニクスが挙げられる。パワーエレクトロニクスは電力変換回路などのアプリケーションに用いられ、高効率化、小型化、高信頼性を目指して発展してきた。電力変換回路はパワーデバイス、受動部品、制御回路、センサなどで構成される。従来、電力変換回路は半導体材料としてシリコンを使ったパワーデバイスを用いることが主流であったが、シリコンカーバイドやガリウムナイトライドなどのワイドバンドギャップ半導体材料の使用により、回路の高周波・高速スイッチング動作が可能になった。それに伴い、回路の高効率化や受動部品・回路の小型化が進み、電力変換回路の集積化が実現してきている。一般的に電力変換回路には電圧センサや電流センサなどの多くのセンサが回路の制御や特性評価に用いられている。近年の電力変換回路では性能向上と小型化に伴って、これらのセンサの適切な適用が重要になってきている。この電流センサには、パルス電流が流れるため回路動作状態での回路特性評価が従来の電流センサでは困難であることが報告されている。

本論文では電流の計測技術に着目し、集積化が進むと想定される電力変換回路に適した低インダクタンス配線用電流センサの設計及び実装・応用することを目的とする。提案する電流センサは既存の電流センサを適用することが困難であったラミネートバスバーと呼ばれる低インダクタンス配線と一体化した形状である。この電流センサによって電力変換

回路の適切な評価とさらなる性能向上に加え、信頼性の向上が期待できる。また、このセンサの実装によりセンサ数を増加させることも可能となる。

本論文は 6 章で構成されており、各章の概要は以下ようになる。

第 1 章では環境問題及び現状のエネルギーの観点から課題について述べ、これらの解決策の一つとして挙げられるパワーエレクトロニクス必要性を示す。また、近年の電力変換回路が抱える信頼性向上に関する課題を示した上で課題解決のための手法、目的を述べる。

第 2 章では従来の電流センシング技術についてまとめ、電力変換回路に用いられる電流センサについて詳細に述べる。また、近年のパワーデバイスの性能向上について示し、それに伴って発展してきた受動部品、配線などの構成部品の動向をまとめる。さらに近年の電力変換回路に合わせて発展してきた電流センシング技術についても示す。

第 3 章では低インダクタンス配線に適した電流センシング技術として空芯コイルセンサを提案する。このセンサはラミネートバスバー配線間に薄型の空芯コイルを挿入し、ラミネートバスバーとの相互インダクタンスによって発生する誘導起電力からラミネートバスバー配線に流れる電流を計測する。まず、提案センサの構造・原理をログスキーコイルとの違いを明確に示しながら理論的に説明する。次に PCB (Printed Circuit Board) 基板で製作したセンサの試作器を用いて構造と寄生パラメータの関係を明らかにする。また、シミュレーションで得られた寄生パラメータの妥当性を、TDR (Time Domain Reflectometry) によって測定した値と比較することで確認する。さらに、提案センサの等価回路から周波数帯域が 35 MHz であることを確認する。それに加え、空芯コイルセンサの外部ノイズによる影響についても評価を行い、測定端子部の影響が大きいことを示す。

第 4 章では本論文で提案する空芯コイルセンサの応用の 1 つとして過電流検出手法について議論する。提案する過電流検出手法を自動車への応用を想定して入力電圧 800 V、出力電流 100 A の回路を用いて検討する。まず、自動車応用で過電流が発生するケースを示し、空芯コイルセンサを用いて検出可能な過電流を示す。ここで提案する検出手法は空芯コイルセンサに発生する誘導起電力を直接用いた手法であり、従来の積分器を用いる手法よりも高速で検出できる。この検出手法における過電流判別法について議論し、過電流とスイッチング動作時の電流の誘導起電力の違いをシミュレーションと実験により確認する。最後にシミュレーションで妥当性を確認する。

第 5 章では空芯コイルセンサのさらなる応用として広帯域スイッチング電流測定手法を提案する。スイッチング時のパルス電流には数十 MHz の高周波成分が含まれており、100 MHz 程度の周波数帯域が必要である。そのため、従来の相互インダクタンスのみの電流算出手法では正確な電流の計測が困難である。そこで、100 MHz 程度の電流で考慮すべき空芯コイルセンサの寄生パラメータを含んだ後処理法を提案する。また、提案する手法の妥当性を、測定電流の di/dt が 1.5 A/ns のダブルパルス試験により示す。さらに市販の電流プローブを用いることが困難である構造の試作器を用いて測定実験を行い、空芯コイルセン

サの特徴であるラミネートバスバーに流れる電流が測定可能であることを明らかにする。

第 6 章では各章で得られた成果から結論を導き，本論文のパワーエレクトロニクス分野への貢献や今後の展望を示す。